

1. 学術委員会における議論の紹介

塩谷 雅人*

1. はじめに

本講演では、日本気象学会の学術委員会メンバーを中心に取りまとめた「地球観測の強化に向けて日本気象学会は何をなすべきか—地球観測のあり方について—」(「天気」2019年6月号)にもとづいて、その概要を紹介した。日本気象学会では、理事会の会期ごとに学会の活動として重要と思われるテーマを選び、専門家を評議員として招き評議員会を開催しており、第39期は「地球観測の強化に向けて日本気象学会は何をなすべきか」というテーマのもとで議論が行われた。その趣旨としては、観測技術や情報基盤技術の進歩とともに多様化・大容量化する様々な気象データをいかに社会に還元してゆくのか、次の時代に向けた新たな観測システムをいかに構築するのか、そのために気象学会が果たすべき役割は何か?などの問題に答えることであった。上記「天気」記事はまさにその問題に対する考え方を取りまとめたものである。議論の展開としては、地球観測という問題を、装置製作に対する観測要求からはじまって、実際の観測を通して得られるデータをどう処理し、プロダクトとして流通(利活用)してゆくのかという一連の流れの中で捉えようとした。以下、取りまとめた「天気」記事にもとづいて話した内容の概要を記す。

2. 気象学と観測

気象学あるいは大気科学の中心的なテーマは、大気圏に生起する個々の現象を理解するにとどまらず、水圏、地圏、生態圏などからの影響を把握し、地球システムを統合的に理解することである。様々な要素間の

関連性をひもときながらそれらが紡ぎ出す全体像を矛盾なく定量的に把握することで、システムの機能を理解し将来の予測につながる知見を得ようとするような営みであるといえる。

その根拠となる観測データとしては、空間的な代表性には乏しいが継続的な観測として力を発揮する定点観測、空間的な変動を捉えながらメカニズム解明に有効な航空機観測、さらにはグローバルで俯瞰的な描像を得ることのできる衛星観測まで、多様な手段で獲得されるもので、それぞれが相補的な役割を果たしている。観測は大気科学・気象学の源泉であって、そこから得られる情報はプロセス研究から気候変動研究にいたる学術活動の基盤を支えるとともに、観測データから得られる知見は社会に還元され、さらに次の課題に向けた挑戦と新たな観測につながってゆく。

このように、地球システムを理解するためには多様な観測手段が必要であり、それがまさに大気科学・気象学の重要な特性である。一方で測定手段は非常に大がかりなものとなってきており、測器製作に予算と人材をつぎ込めばいいというものではない。なぜそういった測定が必要なのかといった事前の見極め、得たいデータに対する装置開発の要求の先鋭化、データをどう処理し、プロダクトとして流通(利活用)してゆくのかの戦略を持つことが重要となってくる。

3. これまでの気象観測とその展開

1957~58年のIGY以来、世界中の気象官署で基本的な気象要素に関する地上観測、およびゾンデ観測が整備され、ネットワーク化されてきた。観測の効率化が進められる中で、長期観測データを利用する際には、各種測器の検定の状況はもちろんのこと、観測地点の移設や測器の交換、観測手法の変更による影響を考える必要がある。一方で、近年観測技術は格段に進歩し

* 京都大学生存圏研究所。

shiotani.masato.8a@kyoto-u.ac.jp

© 2020 日本気象学会

たが、観測のブラックボックス化が進んでいることも否めない。物理量に変換されたデータセットが簡単に入手できるようになった結果、使用する観測データの精度や特徴を知らずに大量のデータを利用する人が増えている。他の研究分野や社会との関係においても観測データを定量的に評価すること、観測データの精度や特徴をよく理解することは重要である。

計算機の発展にともない、気候モデルの時空間解像度は飛躍的に改善されるとともに、全球雲解像モデルや全球化学輸送モデル、全球エアロゾル輸送モデルなど、多様な数値モデルへ発展してきた。これらの数値モデルの良し悪しは観測データがなければ評価できない。また、数値予報モデルによって日々の天気予報を行う際にも初期値として観測データは必須である。数値モデルに様々な形で利用される観測データの中では、衛星観測データが主流になりつつある。衛星観測の利点としては、広い領域をカバーし均質なデータを提供することのできる点にあるが、これも計算機や通信技術の発展によるところが大きい。TRMMに端を発したレーダーやライダー等のアクティブセンサー搭載の衛星も打ち上げられ、衛星観測データ量は増加し続けている。これらのデータはリアルタイムで物理量に変換され、日々の天気予報や研究に活用されている。

気象学全体が大きくなるにつれて大型観測は以前よりも目立たなくなった（以前はMAP, WCRP, GAMEなど大型国際研究は測地学審議会で建議をまとめ予算措置をして実施）。一方で、日本学術会議が2005年から改編され、2010年以降、大型研究のマスタープランをとりまとめることになり、予算化には直接つながらないものの、国や社会に対して重要な大型研究を提示する仕組みができた。我が国において、地球観測衛星のような多額の費用を要する観測は危機に瀕している。国の財政事情もあり、地球観測衛星については、ユーザーが自分で予算を獲得して計画を進めるべきであるという考え方が強くなっている。最近、気象学会を含む20以上の学会が参加する「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会」が形成され議論されるようになってきた（日本学術会議で2017年7月に提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」を发出）。

4. 観測対象と観測システム

今日の質の高い気象サービスは、地上気象観測、高層気象観測、気象レーダー観測、航空機観測、気象衛

星観測を含む地球衛星観測などの基盤的な観測システムの上に成り立っており、観測システムの整備や継続的な運用はコミュニティ全体で考えるべき重要な課題である。日本に暮らす上で避けることの出来ない台風や集中豪雨・豪雪などの顕著な現象に対して、それらに伴う災害の防災、減災という観点から観測要素や観測手段を検討することは今後の重要なテーマである。降水量データの高精度・高分解能化や対流圏下層の水蒸気の実体把握、航空機を利用した台風の直接観測による強度の把握や台風の予測精度向上、衛星搭載風ライダーや無人航空機、全球測位衛星システム（GNSS）など新しい観測手段の活用も期待される。

長期間のデータにもとづいて微小な変化傾向を論議する気候研究などの観点から、参照データ（基準データ）を蓄積してゆく試みを継続的に行っていく必要がある。そのような活動としてたとえば、気候監視のための高層気象観測ネットワーク（GRUAN）、オゾンや各種温室効果ガスなどのデータを集約・提供するWMO 全球大気監視計画（GAW）、太陽放射・地上放射を精密に測定するための基準地上放射観測網（BSRN）などがある。同様な問題は衛星観測データにも存在しており、データの信頼性を高める意味でも複数の衛星観測データを均質に統合した長期のデータが必要になる。可視・赤外イメージャーも、衛星によってセンサの観測波長や時空間解像度が異なるため、観測状況が異なるセンサから導出される物理量の整合性を担保しなければならない。気候変動研究の裏付けとなる長期にわたる整合性を持ったデータセットを作成しようとする試みは、最終的にはデータ同手法にもとづいて、今後は水蒸気や気温に加え大気微量成分をも含んだ再解析データの作成へと発展していくと考えられる。

大気中の地球温暖化問題に関係する物質の観測は現在多岐にわたっている。また、人間活動に起因する物質として、太陽放射を散乱吸収し、一般に温室効果ガスとは逆に地球の冷却化や雲特性に影響すると考えられているエアロゾルの観測も近年大きく進展している。温室効果ガスの観測で近年特筆すべき点は、衛星による観測が大きく進展したことである。我が国の温室効果ガス観測衛星GOSAT（いぶき）をはじめ、米国や中国でも同様な衛星が打ち上げられ、大陸スケールでの二酸化炭素収支やより高い解像度でのメタン発生量の時空間分布がわかるようになった。多様なエアロゾル観測は、地上観測と衛星観測を組み合わせ、さ

らにはエアロゾル輸送モデルも併せて活用することにより、越境汚染の解明や地球全体のエアロゾル分布の変動メカニズム解明に貢献している。特に、雲凝結核の解明がエアロゾルの観測における大きな課題として残されている。

5. 観測計画の評価

既存の観測データや新規の観測データの数値予報へのインパクトを評価する手段として、観測システム実験 (OSE: Observing System Experiment, 評価対象の観測データを同化した初期値と同化しない初期値からそれぞれ予測実験を行い、その差から観測データの数値予報へのインパクトを評価) や観測システムシミュレーション実験 (OSSE: Observing System Simulation Experiment, 将来の観測システムを設計する際、それが実現したときの数値予報へのインパクトを評価) がある。OSE, OSSE ともに、観測データのインパクトを評価するための数値予報モデルとデータ同化システムが必要であり、さらに標準実験で使用する観測データも必要である。従って、研究コミュニティがこれらを利用して OSE や OSSE による感度解析を実施することが出来るような環境を整備していくことが課題である。

その大気モデルシステムの中で、注目する気象パラメータがどのような感度をもっているのかを知ることによって、そのパラメータを観測することの重要性が理解される (こういった問題を考える際のヒントになるのが、再解析データの作成かもしれない)。気象庁55年長期再解析 (JRA-55) では以下のようなプロダクトを同時に提供することで衛星観測のインパクトやモデル自身の特性について考察することが可能になっている。

- i) 利用可能なデータをすべて取り込んだ標準プロダクト
- ii) 衛星データを使用せず従来型観測データのみを同化したプロダクト
- iii) 観測データを用いず境界値のみを使用した数値モデル結果によるプロダクト

衛星観測データと一口で言ってもオゾンなどの大気微量成分に関するデータの入力はないが、将来的にこういったパラメータも含めた同化実験を行うことによって、モデルシステムにおけるそれぞれのパラメータの感度に関する考察が可能となり、気候研究にとって本当に重要なパラメータは何なのかということをや

り定量的に議論することが可能になると予想される。

6. データのプロダクト化

リトリーバルは、センサにより測定された膨大なデータから物理量を推定する逆問題 (インバージョン) である。その基本的な原理は最適化アルゴリズムのような応用範囲の広い一般的な数値手法が利用されている。その数学的背景やアルゴリズムの原理を理解することは有意義であり、教育的価値が高い。データ利用者にとっても、データの検証やデータの性質、限界を理解するために観測の原理やアルゴリズムについて知ることは重要である。リトリーバルで用いられている観測演算子 (観測モデル) は、数値モデルからの出力にも適用することができる。このような擬似観測は数値モデルの検証に用いられる。衛星データシミュレータに代表される高精度の擬似観測を用いて、OSSE によるセンサの事前評価を行い、新しい観測の導入や長期観測の継続の必要性を国民に対して説明する際に活用することが望まれる。

レーダーや衛星データのリトリーバルとデータ同化が基盤とする数学は共通なものが多いが、独立に発展してきたため同じ概念に別の用語を用いていることが少なくない。地球観測のビッグデータから情報を取り出す手法に関する論議、交流を進めるより、一層の発展が期待される。データ同化研究の進展とともに、知識やコードが共有されるようになり、気象庁の外でもデータ同化研究や同化プロダクトの作成が行われるようになった。我が国においても制約のあるデータの分離を行ったデータの提供が開始されたことから、これを有効活用することによりデータ同化研究が発展していくことが期待される。

再解析データは、これまでの気候変動を捉えるデータとして有用であるとの認識が高まっており、入力する観測データの整備、アルゴリズムの改良を通じた質の改善や期間の長期化、分解能の向上が望まれる。再解析データの質を一層向上させるためには、数値モデルの精度向上が不可欠である。再解析を付加価値の高いデータとして活用していくためには、単に観測するだけではなく素過程に対する理解とそれをモデルに反映させることが必要である。

7. データの流通、オープンサイエンス

論文の再現性・再検証を担保するためには論議の基礎となるデータの素性が明らかになっている必要があ

り、成果物としてのデータが論文として成果を取りまとめる際に必要不可欠な存在になってきている。一方でそのデータの生成・整備は、科学者としての高度な知見や見識にもとづき時間と労力をかけて行われるべきものであるが、こういった作業は科学者の業績としてこれまでなかなか認められてこなかったという現状がある。科学成果を創出するための業務サイクルにおいて不可欠なデータの生成・整備を行う研究者の立場が評価されない限り、科学者に対する社会からの信頼を維持してゆくことは難しい。科学者コミュニティから社会へ提供できる研究生産物としてこれまでは論文だけが評価対象でありクローズアップされがちであったが、データもまた科学者の業績と認められ、適切な引用・参照とともに利用される必要がある。

こういった流れの中で、科学的に有用なデータの内容を記述する論文誌があらわれている。たとえば代表的なものとして、Scientific Data (Nature), Data in Brief (Elsevier), Geoscience Data Journal (Wiley), Earth System Science Data などがある。また最近、国内でも国立極地研究所が学術出版物のカテゴリーの1つとして Polar Data Journal を創刊している。このように出版社のみならず、学会や研究所といった組織がデータジャーナルを刊行し、データの中身に関する記述に対して責任を持つことで、信頼性を確保しようとしている。具体的な取り組みとして、デジタルオブジェクト識別子 (DOI: Digital Object Identifier) が上げられる。これは対象とするオブジェクト (論文にかぎらない) へのリンク情報を長期にわたって国際的に継続提供するための仕組みであり、データジャーナルで対象となるデータには DOI が付与されていることが条件になってきている。

8. 現状の共通認識と今後の展望

以下には、これまでの論議を踏まえてわれわれが取り組むべきポイントをまとめている。

- ・観測データの重要性に関わるコミュニティの意識形成：大量の観測データが利用されている一方で、フィールド観測やオリジナルに近い衛星観測データを扱う研究は極めて少なくなってきた

る。観測はなぜ必要か、気象学において観測はどのような役割を果たしているのか、さらに基盤的な研究の重要性について共通の理解をもつことが必要である。

- ・観測データの有効利用：観測データは物理量への変換や再解析データなど実用プロダクトとすることで幅広く有効利用される。リトリーバルやデータ同化のアルゴリズムについての教育普及や研究開発を促すとともに、データ作成に関わる作業が業績として適切に評価されるように支援すべきである。
- ・観測計画とその事前評価：観測計画の策定にあたっては OSSE などを通してその評価を行うことが重要である。さらにその技術基盤がコミュニティで共有され利用されるよう普及が図られなければならない。
- ・大型観測計画の策定とその実現に向けて：大型観測計画を進める際には、関係する分野の研究者のみならず社会の多様なステークホルダーのニーズを考慮する必要がある。そういった調整を行うための活動 (たとえば地球衛星観測関連学会の研究者が集う TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ) に学会として積極的に関わっていく必要がある。
- ・社会に対する観測データの重要性についての発信：地球観測は地球の歴史の記録であり、実験などと違って後から再現できないということを社会に知ってもらう必要がある。小中高等学校などにおいても、自然を計測 (観測) することの重要性を教育することが望ましい。
- ・コミュニティあるいは社会にとってのデータの意義：研究者は論文成果だけではなく研究活動の基盤であるデータを重要な成果物として位置づける必要がある (たとえば DOI の付与)。さらにデータを利用して科学的成果を生み出す人材だけではなく、データを獲得し流通することに努力する人材も必要であることを認識して、その活動の正当な評価をコミュニティが行ってゆかなければならない。